

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平8-166610

(43) 公開日 平成8年(1996)6月25日

(51) Int. Cl.

識別記号

F I

G02F 2/00

G02B 6/293

6/42

G02B 6/28

B

H04B 9/00

E

審査請求 未請求 請求項の数 4 O L (全8頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号 特願平6-308823

(22) 出願日 平成6年(1994)12月13日

特許法第30条第1項適用申請有り 平成6年9月19日
社団法人応用物理学会発行の「1994年(平成6年)秋季
第55回応用物理学会学術講演会講演予稿集No.3」に発
表

(71) 出願人 591243103

財団法人神奈川科学技術アカデミー
神奈川県川崎市高津区坂戸3丁目2番1号

(71) 出願人 593154425

齊藤 崇記
神奈川県厚木市林381-1 コーポエメラ
ルド201

(72) 発明者 大津 元一

東京都品川区豊町3-1-8-101

(72) 発明者 興梠 元伸

神奈川県横浜市緑区霧が丘3-22-107

(74) 代理人 弁理士 小池 晃 (外2名)

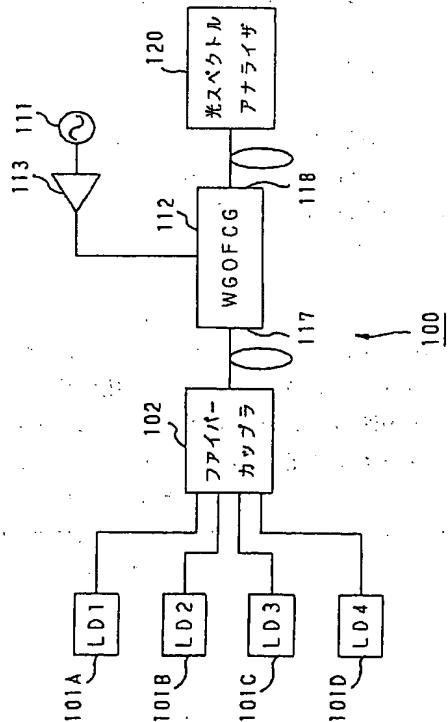
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】多重光周波数コム発生器

(57) 【要約】

【目的】側帯波の発生幅を広げた多重光周波数コム発生器を提供する。

【構成】入射端反射膜117と出射端反射膜118が光入射端と光出射端に形成された光位相変調器112において、複数のレーザ光源101A～101Dから光カップラ102を介して入射された互いに波長の異なるレーザ光の位相を発振器111からの周波数fmの変調信号に応じて変調することにより、上記レーザ光の周波数を中心に低周波側と高周波側に上記変調信号の周波数fm間隔毎にレーザ光のサイドバンドを発生する。



【特許請求の範囲】

【請求項 1】 互いに波長の異なるレーザ光を出射する複数のレーザ光源と、周波数 f_m の変調信号を発生する発振器と、上記複数のレーザ光源から入射された互いに波長の異なるレーザ光の位相を上記発振器からの変調信号に応じて変調する光位相変調器と、上記光位相変調器の光入射端と光出射端に形成され、入射されたレーザ光を上記光位相変調素子内部で共振させる入射端反射膜と出射端反射膜と、上記複数のレーザ光源から出射された波長の異なるレーザ光を合波して上記入射端反射膜を介して上記光位相変調器に入射させる光カップラとからなり、上記光位相変調器において入射された各レーザ光の周波数を中心と低周波側と高周波側に上記変調信号の周波数 f_m 間隔毎に光の側帯波を発生することを特徴とする多重光周波数コム発生器。

【請求項 2】 上記光位相変調器は導波路型光位相変調器からなることを特徴とする請求項 1 記載の多重光周波数コム発生器。

【請求項 3】 上記光カップラは光ファイバカップラからなることを特徴とする請求項 1 記載の多重光周波数コム発生器。

【請求項 4】 上記光位相変調器から上記出射端反射膜を介して出射される光周波数コムについて、2つのレーザ光源から出射されたレーザ光に対する側帯波のヘテロダイン成分を検出するヘテロダイン信号検出器を設け、上記ヘテロダイン信号検出器により検出されたヘテロダイン信号を上記 2 つのレーザ光源の一方に負帰還することを特徴とする請求項 1 記載の多重光周波数コム発生器。

【発明の詳細な説明】

【0 0 0 1】

【産業上の利用分野】 本発明は、周波数間隔一定の側帯波をもつレーザ光を発生する光周波数コム発生器に関し、特に、光位相変調器を用いた多重光周波数コム発生器に関するものである。

【0 0 0 2】

【従来の技術】 2 つのレーザ光をヘテロダイン検波させてその差周波数を測定あるいは制御する場合、その帯域は受光素子の帯域で制限され、おおむね数十 GHz 程度であるので、光周波数コム発生器を用いて広帯域なヘテロダイン検波系を構築するようにしている。光周波数コム発生器は、入射したレーザ光の側帯波を等周波数間隔毎に数百本発生させるもので、発生される側帯波の周波数安定度はもとのレーザ光のそれとほぼ同等である。そこで、この側帯波と他のレーザ光をヘテロダイン検波させれば、数 THz に亘る広帯域なヘテロダイン検波系を構築することができる。

【0 0 0 3】 従来の光周波数コム発生器は、例えば図 7

に示すように、2 枚の反射鏡 31, 32 を対向させて設置してなる光共振器 33 と、マイクロ波の変調信号が注入されるマイクロ波導波管 34 中にニオブ酸リチウム (LiNbO_3) などの電気光学結晶基板 35 を設置してなるバルク型の光位相変調器 36 とを備え、上記光共振器 33 内を往復するレーザ光の光路上に上記光位相変調器 36 を設置した構造となっていた。

【0 0 0 4】

【発明が解決しようとする課題】 しかし、上述の如き構成の従来の光周波数コム発生器では、次のような問題点があった。第 1 に、光共振器 33 内を往復するレーザ光の光路上に光位相変調器 36 が設置されているために、1 往復当たり 2 回の入射損失と 2 回の出射損失があるので上記光共振器 33 のフィネスが低下し、側帯波の発生効率が極めて低い。第 2 に、光共振器 33 を構成する 2 枚の反射鏡 31, 32 を正確に平行に保持するための保持具が必要であり、光周波数コム発生器全体が大型化する。

【0 0 0 5】 そこで、本件出願人は、特願平 5 - 2 0 3 4 4 1 号として、例えば図 1 に示すような構成とすることにより、高効率、低コスト、無調整で良好な精度が得られるようにした光周波数コム発生器を先に提案している。

【0 0 0 6】 図 1 は、特願平 5 - 2 0 3 4 4 1 号に係る光周波数コム発生器 10 を用いて構築したヘテロダイン検波系を示すプロックである。このヘテロダイン検波系は、ヘテロダイン検波用のレーザ光を出射する第 1 のレーザ光源 1 と、被測定用のレーザ光を出射する第 2 のレーザ光源 1 と、上記第 1 のレーザ光源 1 からのヘテロダイン検波用のレーザ光が入射される光周波数コム発生器 10 と、上記光周波数コム発生器 10 で発生された光周波数コムと上記第 2 のレーザ光源 2 からの被測定用のレーザ光とを混合する光学系 3 と、この光学系 3 により混合されたレーザ光を受光する光検出器 4 とからなり、ヘテロダイン検波出力として上記光周波数コムと被測定用のレーザ光の差周波数成分を上記光検出器 4 から出力する。

【0 0 0 7】 上記光周波数コム発生器 10 は、発振器 1 1 からの周波数 f_m の変調信号に応じて、入射されたレーザ光の位相を変調する導波路型光位相変調器 12 を備える。

【0 0 0 8】 上記導波路型光位相変調器 12 は、図 2 に示すように、ニオブ酸リチウム (LiNbO_3) などの電気光学結晶基板 13 からなる。この電気光学結晶基板 13 には、光軸に沿って導波路 14 が形成されているとともに、上記光軸に沿って上記導波路 14 上と該導波路 14 の両側に電極 15, 16 が形成されている。また、上記電気光学結晶基板 13 には、上記光軸に対して垂直な光入射端と光出射端にクロム、金、アルミニウムあるいは誘電体多層膜などを蒸着することにより、入射端反

射膜17と出射端反射膜18が形成されている。

【0009】こののような構造の導波路型光位相変調器12において、上記入射端反射膜17と出射端反射膜18は、該入射端反射膜17を介して入射端から導波路14に入射されたレーザ光を該導波路14内部で共振させるファブリペロエタロンを構成している。

【0010】そして、この導波路型光位相変調器12では、上記発振器11からの周波数 f_m の変調信号が上記電極15, 16に印加され、上記変調信号の応じた電界が上記導波路14に印加されることにより、上記入射端から上記導波路14に入射されたレーザ光の位相を上記変調信号に応じて変調する。しかも、上記導波路型光位相変調器12では、変調信号による電界を導波路14に集中させて、極めて小さな変調所要電力で効率良くレーザ光の位相を変調することができる。

【0011】こののような構成の光周波数コム発生器では、図3に示すような周波数 f_s のレーザ光を上記導波路型光位相変調器12に入射することにより、図4に示すように、上記レーザ光の周波数 f_s を中心に低周波側と高周波側に上記変調信号の周波数 f_m 間隔毎に側帯波 $f_s \pm n f_m$ が発生する。

【0012】そこで、本発明の目的は、このような構成の光周波数コム発生器において、さらに側帯波の発生幅を広げることにある。

【0013】また、本発明の他の目的は、複数の光周波数コムを結合させることにより、1つの周波数基準を持つだけで、全ての側帯波に周波数安定度を持たせることができる多重光周波数コム発生器を提供することにある。

【0014】

【課題を解決するための手段】上述の課題を解決するために、本発明に係る多重光周波数コム発生器は、互いに波長の異なるレーザ光を出射する複数のレーザ光源と、周波数 f_m の変調信号を発生する発振器と、上記複数のレーザ光源から入射された互いに波長の異なるレーザ光の位相を上記発振器からの変調信号に応じて変調する光位相変調器と、上記光位相変調器の光入射端と光出射端に形成され、入射されたレーザ光を上記光位相変調素子内部で共振させる入射端反射膜と出射端反射膜と、上記複数のレーザ光源から出射された波長の異なるレーザ光を合波して上記入射端反射膜を介して上記光位相変調器に入射させる光カップラとからなり、上記光位相変調器において入射された各レーザ光の周波数を中心に低周波側と高周波側に上記変調信号の周波数 f_m 間隔毎に光の側帯波を発生することを特徴とする。

【0015】また、本発明に係る多重光周波数コム発生器は、上記光位相変調器が導波路型光位相変調器からなることを特徴とする。

【0016】また、本発明に係る多重光周波数コム発生器は、上記光カップラが光ファイバカップラからなるこ

とを特徴とする。

【0017】さらに、本発明に係る多重光周波数コム発生器は、上記光位相変調器から上記出射端反射膜を介して出射される光周波数コムについて、2つのレーザ光源から出射されたレーザ光に対する側帯波のヘデロダイン成分を検出するヘデロダイン信号検出器を設け、上記ヘデロダイン信号検出器により検出されたヘデロダイン信号を上記2つのレーザ光源の一方に負帰還することを特徴とする。

【0018】

【作用】本発明に係る多重光周波数コム発生器では、入射端反射膜と出射端反射膜が光入射端と光出射端に形成された光位相変調器自身が光共振器として機能する。上記光位相変調器は、複数のレーザ光源から光カップラを介して入射された互いに波長の異なるレーザ光を位相変調してすることにより、各レーザ光の周波数を中心に低周波側と高周波側に上記変調信号の周波数 f_m 間隔毎に光の側帯波を発生する。また、導波路型光位相変調器は、変調信号による電界を導波路に集中させることができる。

【0019】上記光位相変調器から上記出射端反射膜を介して出射される光周波数コムについて、2つのレーザ光源から出射されたレーザ光に対する側帯波のヘデロダイン成分を検出して、上記2つのレーザ光源の一方に負帰還することにより、各をレーザ光の側帯波を結合させる。

【0020】

【実施例】以下、本発明に係る多重光周波数コム発生器の実施例について、図面を参照しながら詳細に説明する。

【0021】本発明に係る多重光周波数コム発生器は、例えば図5に示すように構成される。

【0022】この図5に示した多重光周波数コム発生器100は、上述の図1に示したヘテロダイン検波系を構築する導波路型光周波数コム発生器(WG-OFCG:Waveguide Type Optical Frequency Comb Generator)に本発明を適用したものであって、発振器111からの周波数 f_m の変調信号に応じて、入射されたレーザ光の位相を変調する導波路型光位相変調器112を備え、4個のレーザ光源101A, 101B, 101C, 101Dから光カップラ102を介して互いに異なる波長 λ_A , λ_B , λ_C , λ_D のレーザ光が上記導波路型光位相変調器112に入射されるようになっている。

【0023】この実施例の多重光周波数コム発生器100において、上記4個のレーザ光源101A, 101B, 101C, 101Dは、それぞれ発振周波数の異なるレーザダイオードからなり、互いに異なる波長 $\lambda_A = 1.50\text{ }\mu\text{m}$, $\lambda_B = 1.52\text{ }\mu\text{m}$, $\lambda_C = 1.54\text{ }\mu\text{m}$, $\lambda_D = 1.56\text{ }\mu\text{m}$ のレーザ光を出射するようになっている。

【0024】また、上記光カップラ102は、例えば光ファイバカップラからなり、上記4個のレーザ光源101A, 101B, 101C, 101Dから出射された互いに異なる波長 λ_a , λ_b , λ_c , λ_d のレーザ光を合波して、上記導波路型光位相変調器112に入射するようになっている。

【0025】さらに、上記発振器111は、例えば周波数 $f_m = 13.012\text{ GHz}$ で、パワーが2Wの変調信号を上記增幅器113を介して上記導波路型光位相変調器112に供給するようになっている。

【0026】さらに、上記導波路型光位相変調器112は、ニオブ酸リチウム(LiNbO₃)などの電気光学結晶基板からなる。この電気光学結晶基板には、光軸に沿って導波路が形成されているとともに、上記光軸に沿って上記導波路上と該導波路の両側に電極が形成されている。また、上記電気光学結晶基板には、上記光軸に対して垂直な光入射端と光出射端にクロム、金、アルミニウムあるいは誘電体多層膜などを蒸着することにより、入射端反射膜117と出射端反射膜118が形成されている。

【0027】このような構造の導波路型光位相変調器112において、上記入射端反射膜117と出射端反射膜118は、該入射端反射膜117を介して入射端から導波路に入射された各レーザ光を該導波路内部で共振させるファブリペロエタロンを構成している。

【0028】そして、この導波路型光位相変調器112では、上記発振器111からの周波数 f_m の変調信号が上記電極に印加され、上記変調信号の応じた電界が上記導波路に印加されることにより、上記入射端から上記導波路に入射された各レーザ光の位相を上記変調信号に応じて変調する。しかも、上記導波路型光位相変調器112では、変調信号による電界を導波路に集中させて、極めて小さな変調所要電力で効率良く各レーザ光の位相を変調することができる。

【0029】このような構成の多重光周波数コム発生器では、波長が λ のレーザ光を上記導波路型光位相変調器112に入射することにより、上記レーザ光の周波数 C/λ (Cは光速)を中心に低周波側と高周波側に上記変調信号の周波数 f_m 間隔毎に側帯波 $C/\lambda \pm n f_m$ が発生する。

【0030】そして、このような構成の多重光周波数コム発生器100では、そのFSRを1.86GHz、フィネスを10とした場合に、上記4個のレーザ光源101A, 101B, 101C, 101Dから互いに異なる波長 λ_a , λ_b , λ_c , λ_d のレーザ光を上記導波路型光位相変調器112に入射して、該導波路型光位相変調器112からの出射光を光スペクトルアナライザ120で観測したところ、上記変調信号を入力しない無変調状態すなわち側帯波非発生状態では、図6のAに示すように、上記波長 λ_a , λ_b , λ_c , λ_d に対応する4つの周波

数 C/λ_a , C/λ_b , C/λ_c , C/λ_d のレーザ光であったのに対し、上記変調信号を入力した変調状態すなわち側帯波発生状態では、図6のBに示すように、上記波長 λ_a , λ_b , λ_c , λ_d に対応する4つの周波数 C/λ_a , C/λ_b , C/λ_c , C/λ_d を中心周波数とする側帯波を発生させ、約80nmの範囲に亘って側帯波を発生させた光周波数コムを得ることができた。

【0031】ここで、上記図6のA及びBに示した各曲線は、光ファイバの伝送ロスを示しており、伝送ロスが最小となる範囲の大部分に側帯波が発生している。

【0032】なお、Ti-LiNbO₃導波路面に偏波保存ファイバを接続したファイバ結合型WG-OFCGを作成し、周波数13.014GHz、位相変調指數3πで駆動中の上記WG-OFCGに2台のレーザ光源から発振波長1.538μmと1.562μmのレーザ光を光ファイバカップラを介して入射させ、発生した側帯波の包絡線を光スペクトルアナライザで観測したところ、図7に示すように、40nm(=5THz)の広範囲に亘る光周波数コムを得ることができた。

【0033】また、本発明に係る多重光周波数コム発生器200は、例えば図8に示すように構成される。

【0034】この図8に示した多重光周波数コム発生器200は、上述の図1に示したヘテロダイイン検波系を構築する導波路型光周波数コム発生器(WG-OFCG:Waveguide Type Optical Frequency Comb Generator)に本発明を適用したものであって、発振器211からの周波数 f_m の変調信号に応じて、入射されたレーザ光の位相を変調する導波路型光位相変調器212を備え、2個のレーザ光源201A, 201Bから光カップラ202を介して互いに異なる波長 λ_a , λ_b のレーザ光が光カップラ202を介して上記導波路型光位相変調器212に入射されるとともに、上記導波路型光位相変調器212の出射光が光検出器221により検出されて、その検出出力が上記レーザ光源201Bに負帰還されるようになっている。上記導波路型光位相変調器212には、入射端から導波路に入射された各レーザ光を該導波路内部で共振させるファブリペロエタロンを構成する入射端反射膜217と出射端反射膜218が設けられている。

【0035】この実施例の多重光周波数コム発生器200において、上記光検出器221は、上記2個のレーザ光源201A, 201Bから出射された互いに異なる波長 λ_a , λ_b のレーザ光を上記発振器211からの周波数 f_m の変調信号に応じて上記導波路型光位相変調器212で位相変調した出射光について、上記波長 λ_a , λ_b に対応する2つの周波数 C/λ_a , C/λ_b を中心周波数とする側帯波を発生させた2つの光周波数コム間のヘテロダイイン信号を検出して、そのヘテロダイイン信号を上記レーザ光源201Bに負帰還するようになっている。

【0036】ここで、上記導波路型光位相変調器212

の出射光として得られる周波数 $C/\lambda_A, C/\lambda_B$ を中心周波数とする側帯波を発生させた 2 つの光周波数コムのスロープ部を図 9 に示すようにオーバーラップさせた場合のヘテロダイン信号は、多数の側帯波ペアのヘテロダイン信号の重ね合わせとなる。そして、側帯波ペアの双方のパワーが白色ノイズレベル以上の範囲すなわち図 9 に示す各領域 A, B, C の信号のみが有効となるが、領域 B では、ヘテロダイン信号の位相が隣同士でずれているため、全て打ち消し合う。従って、領域 A と領域 C のヘテロダイン信号のみが検出されることになる。

【0037】上記 2 個のレーザ光源 201A, 201B から上記導波路型光位相変調器 212 に入射される各レーザ光の周波数差 $C/\lambda_A - C/\lambda_B$ を 0.44 THz ($= 3.6 \text{ nm}$) としたときの、上記導波路型光位相変調器 212 の出射光を光スペクトルアナライザ 231 で観測したところ、上記変調信号を入力しない無変調状態すなわち側帯波非発生状態では、図 10 の A に示すように、上記波長 λ_A, λ_B に対応する 2 つの周波数 $C/\lambda_A, C/\lambda_B$ のレーザ光であったのに対し、上記変調信号を入力した変調状態すなわち側帯波発生状態では、図 10 の B に示すように、上記波長 λ_A, λ_B に対応する 2 つの周波数 $C/\lambda_A, C/\lambda_B$ を中心周波数とする側帯波を発生させることができた。

【0038】そして、それぞれの発振線幅が 1 MHz の各レーザ光源 1A, 1B からの各レーザ光に対する 1 つの側帯波ペアのヘテロダイン信号の線幅は 2 MHz であり、上記光検出器 221 では、上記導波路型光位相変調器 212 の出射光から線幅が 2 MHz のヘテロダイン信号が検出される。なお、上記導波路型光位相変調器 212 の出射光について、側帯波ペアの差周波数を 40 MHz としてヘテロダイン信号を RF スペクトルアナライザ 232 で観測したところ、図 11 に示すように、重ね合わせによる劣化を伴うことなく、線幅が 2 MHz のヘテロダイン信号が観測された。

【0039】この実施例の多重光周波数コム発生器では、上記光検出器 221 で検出されたヘテロダイン信号を上記レーザ光源 201B に負帰還させることにより、2 つの周波数コムは結合される。従って、上記レーザ光源 201A の発振周波数を安定化することにより、1 つの周波数基準を持つだけで、全ての側帯波に周波数安定度を持たせることができる。

【0040】

【発明の効果】本発明に係る多重光周波数コム発生器は、入射端反射膜と出射端反射膜が光入射端と光出射端に形成された光位相変調器自身が光共振器として機能する。上記光位相変調器は、複数のレーザ光源から光カップラを介して入射された互いに波長の異なるレーザ光を位相変調してすることにより、各レーザ光の周波数を中心と低周波側と高周波側に上記変調信号の周波数 $f \text{ m}$ 間隔毎に光の側帯波を発生するので、広範囲に亘る光周波

10 数コムを得ることができる。また、導波路型光位相変調器は、変調信号による電界を導波路に集中させて、極めて小さな変調所要電力で効率良く各レーザ光の位相を変調することができる。

【0041】さらに、本発明に係る多重光周波数コム発生器は、上記光位相変調器から上記出射端反射膜を介して出射される光周波数コムについて、2 つのレーザ光源から出射されたレーザ光に対する側帯波のヘテロダイン成分を検出して、上記 2 つのレーザ光源の一方に負帰還することにより、2 つの周波数コムを結合させることができる。従って、一方のレーザ光源の発振周波数を安定化することにより、1 つの周波数基準を持つだけで、全ての側帯波に周波数安定度を持たせることができる。

【図面の簡単な説明】

【図 1】本発明に係る多重光周波数コム発生器が適用されるヘテロダイン検波系を示すブロック図である。

【図 2】先に提案した光周波数コム発生器の構成を模式的に示す斜視図である。

【図 3】上記光周波数コム発生器に入射されるレーザ光のスペクトル図である。

【図 4】上記光周波数コム発生器により発生した光周波数コムのスペクトル図である。

【図 5】本発明に係る多重光周波数コム発生器の構成を模式的に示すブロック図である。

【図 6】図 5 に示した多重光周波数コム発生器が出射したレーザ光について、側帯波非発生状態と側帯波発生状態を光スペクトルアナライザで観測した結果を示す特性線図である。

【図 7】本発明に係る他の多重光周波数コム発生器が出射したレーザ光を光スペクトルアナライザで観測した側帯波の包絡線を示す特性線図である。

【図 8】本発明に係る多重光周波数コム発生器の他の構成を模式的に示すブロック図である。

【図 9】図 8 に示した多重光周波数コム発生器が出射したレーザ光の光周波数コムのヘテロダイン信号の検出を説明するための側帯波の発生状態を模式的に示す図である。

【図 10】図 8 に示した多重光周波数コム発生器が出射したレーザ光について、側帯波非発生状態と側帯波発生状態を光スペクトルアナライザで観測した結果を示す特性線図である。

【図 11】図 8 に示した多重光周波数コム発生器が出射したレーザ光のヘテロダイン信号を RF スペクトルアナライザで観測した結果を示す特性線図である。

【図 12】従来の光周波数コム発生器の構成を模式的に示す斜視図である。

【符号の説明】

100, 200 多重光周波数コム発生器

101A~101D, 201A, 201B レーザ光源

102, 202 光ファイバカップラ

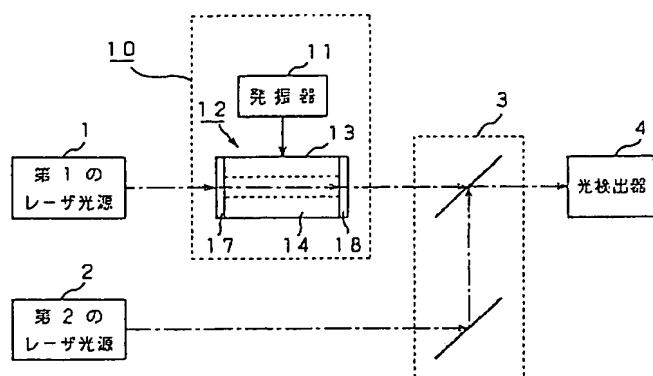
111, 211 発振器

118, 228 出射反射膜

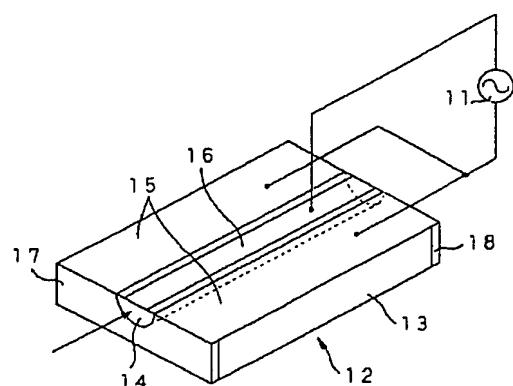
117, 217 入射反射膜

221 光検出器

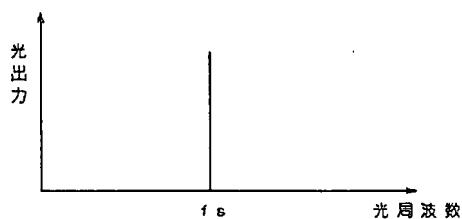
【図 1】



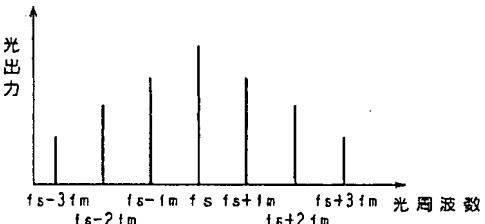
【図 2】



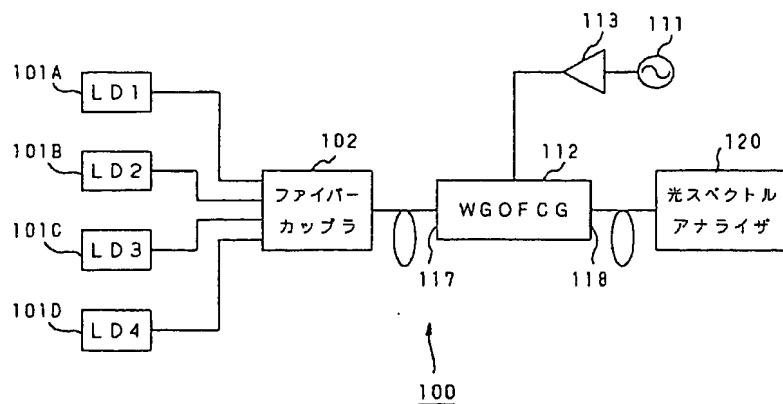
【図 3】



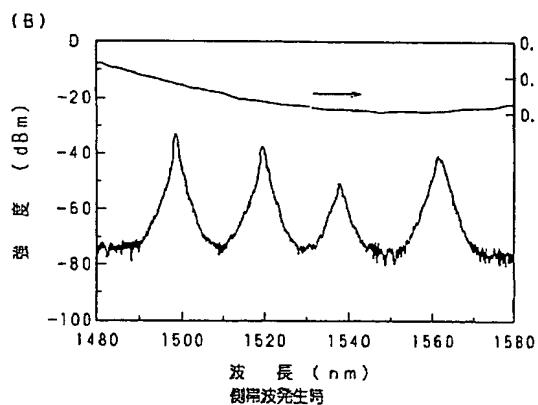
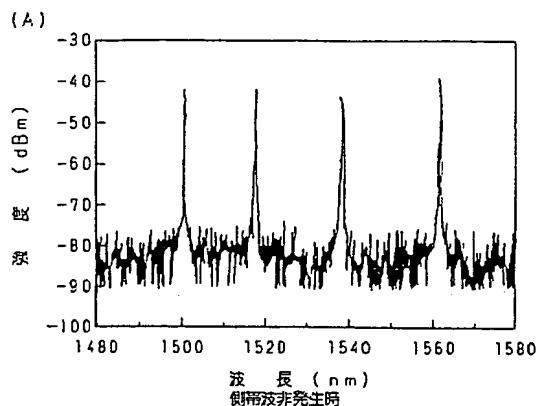
【図 4】



【図 5】

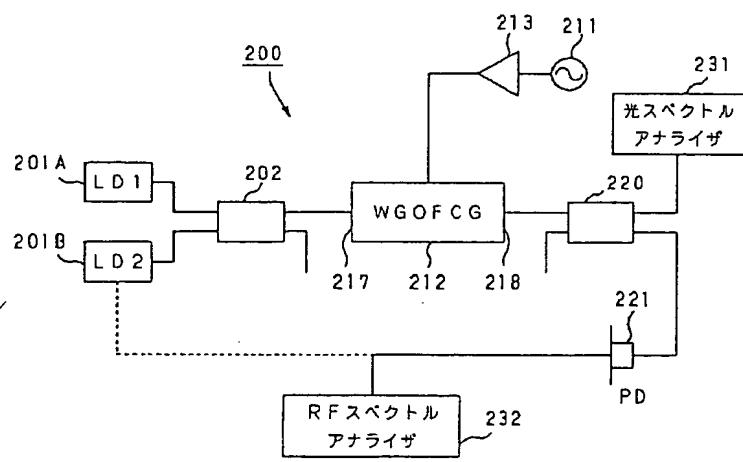


【図 6】

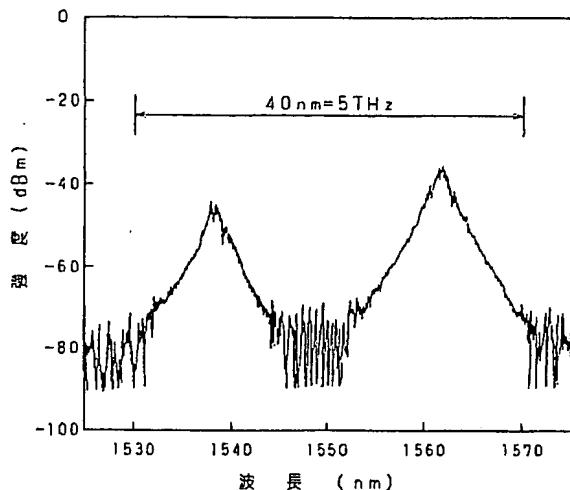


4台のLDによる4重光周波数コム

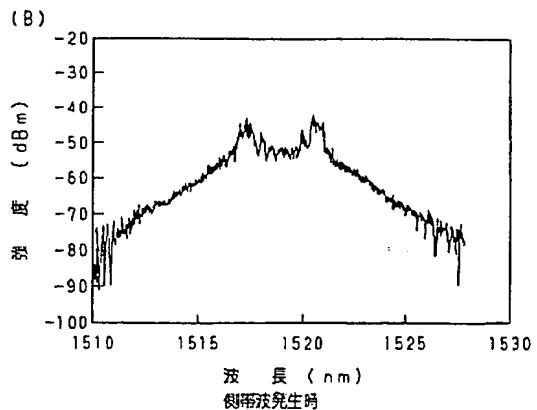
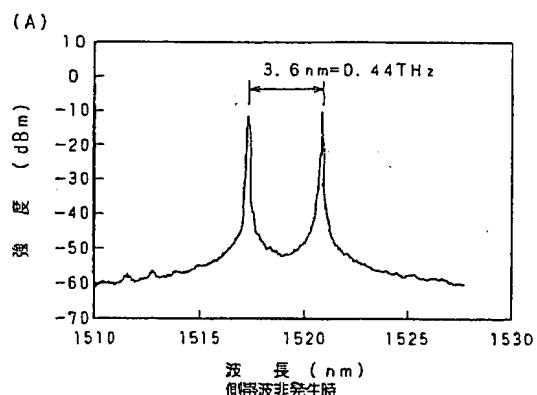
【図 8】



【図 7】

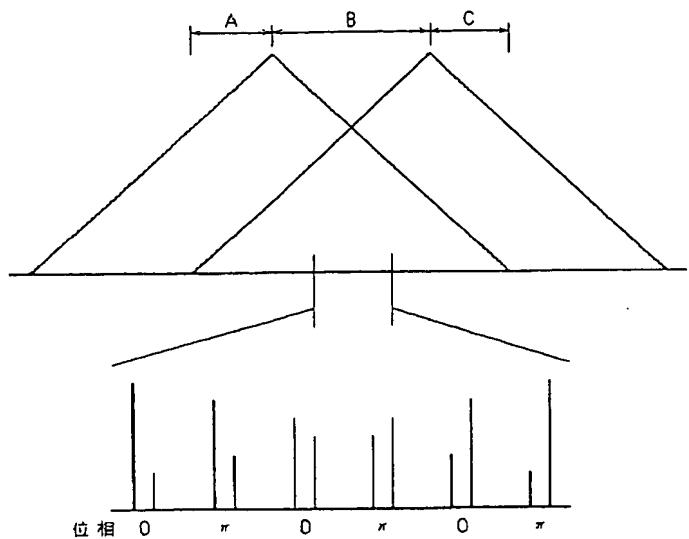


【図 10】

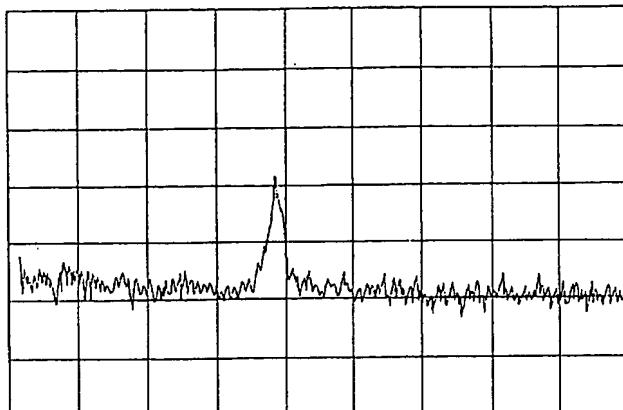


光周波数コム同志のヘテロダイン校正

【図 9】

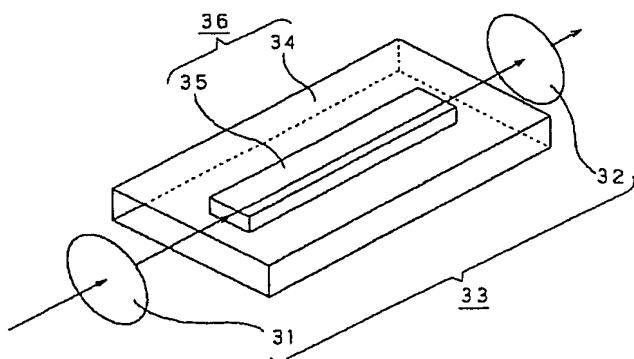


【図 11】



X: 10MHz/div
Y: 10dB/div
光周波数コム同志のヘテロダイン検波

【図 12】



フロントページの続き

(51) Int. Cl.⁶

識別記号 庁内整理番号

F I

技術表示箇所

G 0 2 F 1/035

H 0 1 S 3/131

3/133

H 0 4 J 14/00

14/02

(72) 発明者 齊藤 崇記

神奈川県厚木市林381-1 コーポエメラ
ルド201

(72) 発明者 エリック デュラン

神奈川県川崎市高津区末長794-302